Vol.12, No.1, Spring 2023, pp.87-101 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.74988.1164 Open access

Wildfires in Thinned versus Unthinned Plantation-Type Stands in Northern Iran

Roghayeh Jahdi[a*]

[a] *Assistant Professor in Forest Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

Received: 28 January 2022 ***Revised: 2 May 2022*** ***Accepted: 8 May 2022***

Abstract

Silvicultural treatments have been applied in the last decades to broadleaf and conifer plantations to increase resilience by enhancing structural and age-class diversity in northern Iran. The treatments included mechanical thinning manipulations, not followed by surface fuel reduction treatments like prescribed burning. The goal of this study was analyzing the impact of stand-level silvicultural thinning on landscape-scale wildfire behavior. FlamMap minimum travel time (MTT) fire modeling system was used to simulate the impacts of thinning on fire growth and behavior based on spatial and temporal patterns of historical fire ignitions and associated weather and fuel moisture conditions within a forest landscape. Simulations were done by setting two different fuel moisture scenarios: 1) fuel moisture is fixed as the stands thinned, and 2) fuel moisture is reduced with the same degree of thinning. The results showed that thinning alone can be somewhat effective at mitigating the wildfires; as the landscape proportion with low burn probabilities (BP), conditional flame lengths (CFL), and fire sizes (FS) increases. This trend was not the same at higher values of these parameters. Although fine fuel moisture in thinned stands was lower than in unthinned stands, the fuel moisture difference resulting from stand thinning did not substantially influence fire behavior at the landscape level. The findings of this study can be used for better fire and fuel management and other land-use objectives in fire-prone areas.

Keywords: Fuel Moisture, Siahkal Forest, Silvicultural Treatment, Thinning, Wildfire Behavior

[*] E-mail: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir Tel: + 989112340249

How to cite this Article: Jahdi, R. (2023). Wildfires in Thinned versus Unthinned Plantation-type Stands in Northern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *12*(1), 87-101.
DOI:10.22067/geoeh.2022.74988.1164

Geography and Environmental Hazards
Volume 12, Issue 1 - Number 45, Spring 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74988.1164

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شمارۀ چهل و پنجم، بهار ۱٤۰۲، صص ۱۰۱-۸۷

مقاله پژوهشی

آتش‌سوزی‌ها در توده‌های جنگل‌کاری تنک‌شده و تنک‌نشده در شمال ایران

رقیه جهدی[۱] – استادیار علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۱۱/۸ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۱/۲/۱۲ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/۲/۱۸

چکیده

در جنگل‌کاری‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ، تیمارهای جنگل‌شناسی برای افزایش تاب‌آوری از طریق بهبود تنوع ساختاری و کلاسه سنی در شمال ایران، اعمال شده است. این تیمارها شامل دست‌کاری‌های مکانیکی مانند تنک‌کردن بود که با تیمارهای کاهش ماده‌سوختنی سطحی مانند سوزاندن تجویزی همراه نبود. هدف از این مطالعه تجزیه‌وتحلیل چگونگی اثر تنک‌کردن جنگل‌شناسی در سطح توده بر رفتار آتش در مقیاس سیمای سرزمین است. از سیستم مدل‌سازی آتش FlamMap با الگوریتم حداقل زمان حرکت (MTT) برای شبیه‌سازی اثر تنک‌کردن بر رشد آتش بر اساس الگوهای مکانی و زمانی احتراق تاریخی و شرایط آب‌وهوا و رطوبت ماده‌سوختنی مرتبط در سیمای سرزمین جنگل سیاهکل استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها تحت دو سناریو مختلف رطوبت ماده‌سوختنی انجام شد: ۱) رطوبت ماده‌سوختنی ثابت با تنک‌کردن توده‌ها و ۲) رطوبت ماده‌سوختنی کاهش‌یافته با همان درجه تنک‌کردن. نتایج نشان داد که تنک‌کردن به‌تنهایی می‌تواند تا حدودی در کاهش شدت آتش مؤثر باشد، به‌نحوی‌که سهم سیمای سرزمین با مقادیر کم احتمال سوختن، طول شعله شرطی و اندازه آتش، افزایش یافت. این روند در مقادیر زیادتر این مؤلفه‌ها یکسان نبود. اگرچه رطوبت ماده‌سوختنی ریز در توده‌های تنک‌شده کمتر از توده‌های تنک‌نشده بود، این تفاوت رطوبت ماده‌سوختنی ناشی از تنک‌کردن توده بر رفتار آتش در سطح سیمای سرزمین تأثیر مهمی نداشت.

---

۱ نویسنده مسئول ۰۹۱۱۲۳٤۰۲٤۹ Email: roghayeh.jahdi@uma.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

جهدی، رقیه؛ ۱٤۰۲. آتش‌سوزی‌ها در توده‌های جنگلکاری تنک‌شده و تنک‌نشده در شمال ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۱). صص ۱۰۱-۸۷

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74988.1164

یافته‌های این مطالعه برای ارزیابی اثربخشی کاهش ماده‌سوختنی ناشی از تنک‌کردن (بدون آتش تجویزی) می‌تواند از طریق مدیریت بهتر آتش و ماده‌سوختنی و سایر اهداف استفاده از زمین در مناطق مستعد آتش‌سوزی موردتوجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: جنگل سیاهکل، رطوبت ماده‌سوختنی، تیمار جنگل‌شناسی، تنک‌کردن، رفتار آتش.

۱- مقدمه

آتش‌سوزی‌ها یکی از تهدیدات اصلی جنگل‌ها است که باعث خسارات اقتصادی و محیطزیستی می‌شود. در دهه‌های گذشته، جنگل‌کاری‌ها که در سراسر جهان در حال گسترش هستند از بوم‌سازگان‌های مکرر سوخته‌شده در جهان به‌شمار می‌آیند (دکاسترو گالیزیا و رودریگز[۱]، ۲۰۱۹). در حال حاضر این جنگل‌کاری‌ها ۷ درصد از کل مناطق جنگلی جهان را در بر می‌گیرند و تقریباً ۳۳ درصد از چوب گرد دنیا را فراهم می‌کنند (فریر–اسمیت[۲] و همکاران، ۲۰۱۹). بااین‌وجود، مطالعات متعددی نشان داده که جنگل‌کاری‌ها منجر به افزایش خطر آتش و توزیع مکانی رخداد آتش در مناطق مستعد آتش‌سوزی شده است (مارتین[۳] و همکاران، ۲۰۱٦؛ جاکو کاستلو[٤] و همکاران، ۲۰۲۱). جنگل‌کاری‌ها به‌ویژه از نوع سوزنی‌برگان ساختار و بارهای ماده‌سوختنی را تغییر می‌دهد و موجب آسیب‌پذیری نسبت به آتش‌سوزی‌های شدید شده و درنتیجه روی رژیم آتش بوم‌سازگان جنگل اثر می‌گذارد (پاریتسیس[٥] و همکاران، ۲۰۱۸).

تیمارهای کاهش ماده‌سوختنی (به‌عنوان‌مثال تنک‌کردن و آتش‌سوزی تجویزی) پتانسیل زیادی در مدیریت آتش برای کاهش تجمع و پیوستگی ماده‌سوختنی و به‌عنوان یک رویکرد پیشگیری از آتش‌سوزی در بوم‌سازگان‌های مستعد آتش‌سوزی دارد. تنک‌کردن به‌عنوان یکی از متداول‌ترین تیمارهای ماده‌سوختنی، به‌طورکلی یک ابزار مؤثر و قوی مدیریت جنگل است که منجر به تقویت رشد درختان (از طریق کاهش تعداد درختان در یک توده) و بازسازی سلامت جنگل می‌شود (کنپ[٦] و همکاران، ۲۰۱۷). با تأثیر بر ساختار و ترکیب جنگل، تنک‌کردن باعث افزایش تاب‌آوری این بوم‌سازگان نسبت به آشفتگی‌های آتی مانند آتش‌سوزی می‌شود و به اثربخشی روش‌های مدیریت آتش کمک می‌کند (هود[۷] و همکاران، ۲۰۱٦؛ پارسونز[۸] و همکاران، ۲۰۱۸). به‌طورکلی درجه اثربخشی تیمارهای ماده‌سوختنی در دستیابی به اهداف اکولوژیکی مانند کاهش خطر آتش وابسته به عوامل متعددی است که در مناطق

1 de Castro Galizia and Rodrigues
2 Freer-Smith
3 Martín
4 Jaque Castillo
5 Paritsis
6 Knapp
7 Hood
8 Parsons

محدودی مطالعه شـده اسـت. شـرایط توده جنگل قبل از تیمار و ماهیت تیمار می‌تواند روی دستاوردها اثر گذارد و عدم‌قطعیت در شـرایط سـوختن آتش در منطقه تیمارشـده از چالش‌های اصـلی برای این مطالعات اسـت (کالیس و کنت[1]، ۲۰۱٦). در پاسخ به این چالش‌ها، استفاده از مدل‌های رفتار آتش، بررسی دقیق تأثیرات ناهمگونی ماده‌سوختنی بر رفتار آتش‌سـوزی را امکان‌پذیر می‌سازد و فرصتی برای ارزیابی آثار تیمارهای مختلف ماده‌سوختنی فراهم می‌کند. در واقع، تیمارهای ماده‌سـوختنی گزینشی را می‌توان با رویکردهای مدل‌سازی مبتنی بر خطر، برای ارتقای روش‌های مدیریت مؤثرتر و حمایت از سـیاسـت‌های بهتر پیشـگیری از آتش‌سوزی جنگل، ارزیابی کرد (تامپسون و کالکین[2]، ۲۰۱۱؛ گومز-گونزالس[3] و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات مدل‌سـازی زیادی وجود دارد (سـالیس[4] و همکاران، ۲۰۱۸؛ اگر[5] و همکاران، ۲۰۲۰؛ مارشـال[6] و همکاران، ۲۰۲۰؛ هان[7] و همکاران، ۲۰۲۱) که بر روی دسـتیابی به این هدف با ارزیابی اثربخشی و مقرون‌به‌صرفه بودن طیف گسترده‌ای از تیمارهای ماده‌سوختنی تمرکز دارند.

توسـعه اراضـی کشـاورزی، تصاحب زمین در مقیاس بزرگ، شیوه‌های بهره‌برداری در گذشته، چرای بیش‌ازحد دام‌ها و تیمارهای جنگل‌شـناسـی سـاختار جنگل را دگرگون کرده و رژیم آتش را از آتش با شـدت کم تا آمیخته به آتش با شـدت زیاد در جنگل‌های کهن هیرکانی در شـمال ایران در ۳ دهه گذشـته، تغییر داده اسـت. علاوه بر این، درختان سـریع‌الرشد مانند صنوبر، افرا، توسکا و کاج در جنگل‌کاری‌های بزرگ-مقیاس تحت جنگلداری با چرخش کوتاه در این منطقه اسـتفاده شـده است. اگرچه گزارش‌های متناقضی در مطالعات قبلی در مورد اثربخشی تنک‌کردن به‌تنهایی (بدون آتش‌سـوزی تجویزی) بر رفتار آتش‌سـوزی وجود دارد (ایجی و لولی[8]، ۲۰۰٦؛ اسـتس[9] و همکاران، ۲۰۱۲؛ بانرجی[10] و همکاران، ۲۰۲۰؛ جانسـتون[11] و همکاران، ۲۰۲۱)، در این کار، پاسـخ سـیمای سـرزمین به تیمار تنک‌کردن در جنگل‌کاری‌های پهن‌برگ و سـوزنی‌برگ در بوم‌سـازگان جنگلی سـیاهکل، شـمال ایران ارزیابی شـد. بنابراین، هدف مطالعه ارزیابی آثار تنک‌کردن بر خطر بالقوه آتش‌سـوزی و تغییر رطوبت موادسـوختنی سـطحی ریز ناشـی از تنک‌کردن در طی سـال‌های گذشته در منطقه موردمطالعه است. با استفاده از یک مدل رفتار آتش و تعریف سـناریوهای مختلف تیمار ماده‌سوختنی، شبیه‌سازی مشخص-مکانی آتش در موادسوختنی جنگلی منطقه موردمطالعه

---

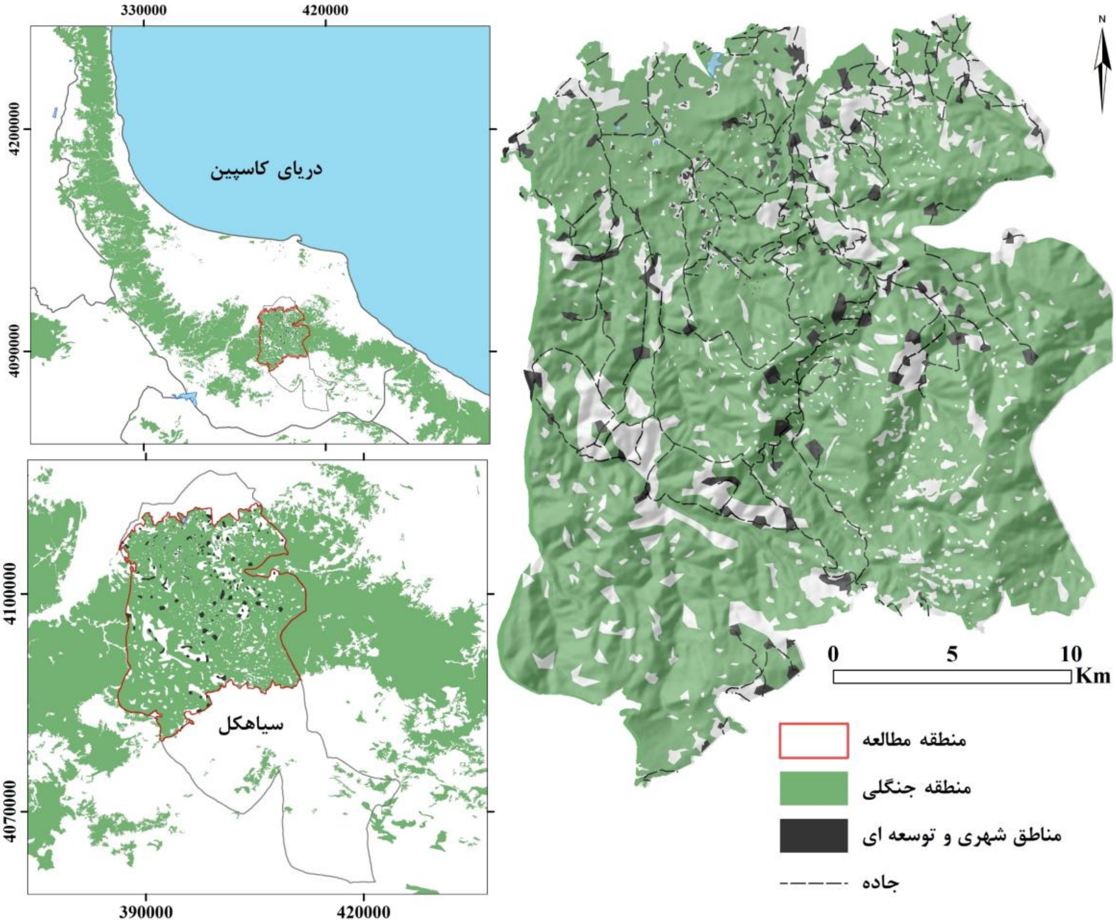
1 Kalies and Kent
2 Thompson and Calkin
3 Gomez-Gonzalez
4 Salis
5 Ager
6 Marshall
7 Hahn
8 Agee and Lolley
9 Estes
10 Banerjee
11 Johnston

انجام شد. ارزیابی کمی تغییرات رفتار آتش‌سوزی ناشی از تنک‌کردن در سیمای سرزمین جنگل موردمطالعه می‌تواند برای برنامه‌ریزی رویکردهای تیمار ماده‌سوختنی و مدیریت موادسوختنی با پتانسیل زیاد خطر آتش مهم باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

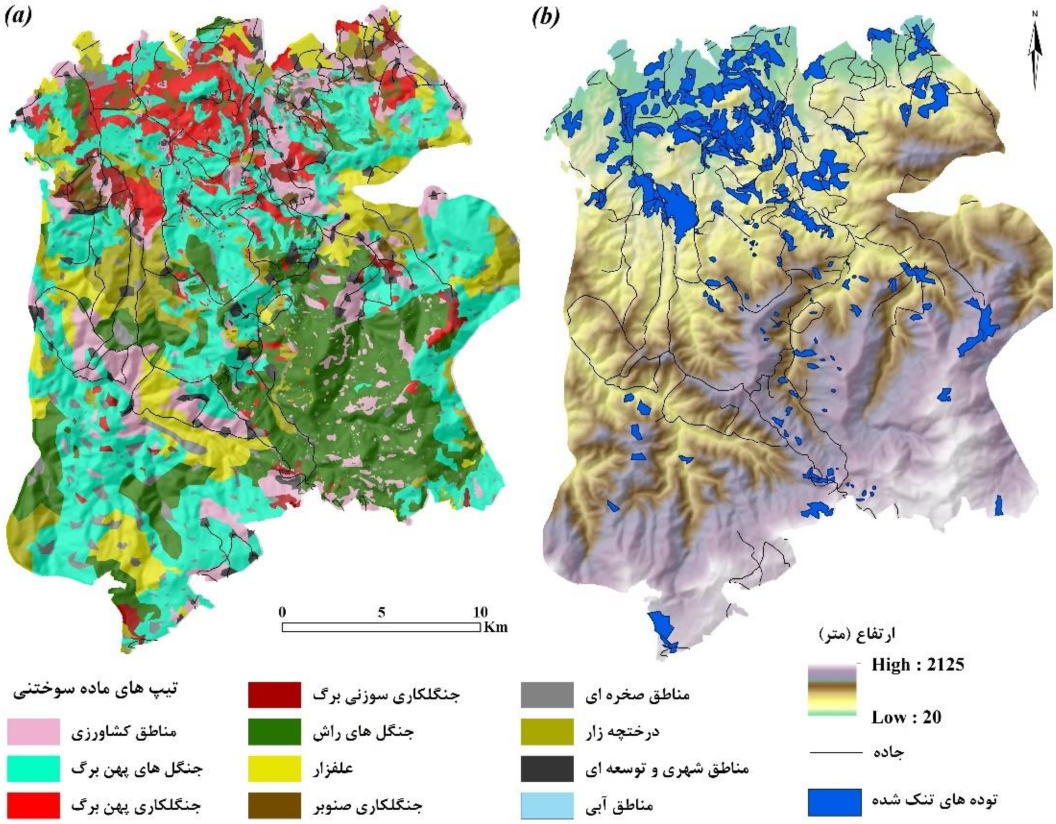
این مطالعه در سیمای سرزمین جنگلی سیاهکل ('۲۰°۴۱-'۶۱ °۳۸ عرض شمالی، '۱۲°۴۱ -'۷۹°۴۰ طول شرقی)، در شمال ایران با وسعت ۵۷,۱۱۰ هکتار انجام شد (شکل ۱). با توجه به دامنه ارتفاعی این منطقه (۲۰ تا ۲۱۲۵ متر از سطح دریا)، از نظر پهنه‌بندی اقلیمی به سه پهنه مجزا تقسیم می‌شود: ۱) پهنه جلگه‌ای در شمال ناحیه و تا ارتفاع ۱۰۰ متر، که با میانگین دمای سالانه ۱۸ سانتی‌گراد و بارندگی ۱۲۰۰ میلی‌متر گرم‌ترین و پرباران‌ترین پهنه اقلیمی ناحیه است. درمجموع این پهنه دارای تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های معتدل است. اغلب سکونت‌گاه‌ها در این ناحیه شکل گرفته است. ۲) پهنه کوهپایه‌ای در جنوب پهنه اول قرار دارد و از نظر ارتفاعی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در نوسان است. از نظر دمایی بسیار معتدل‌تر از پهنه اول و میزان بارندگی در آن بین ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر است. با وجود تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد، این پهنه شامل جنگل‌های متراکم منطقه است. ۳) این پهنه در ارتفاع بالاتر از ۱۵۰۰ متر، با کاهش قابل‌ملاحظه دما و نیز بارندگی سالانه (کمتر از ۸۰۰ میلی‌متر) همراه است. در این پهنه کوهستانی سطوح جنگلی تبدیل به بیشه‌زار و مراتع می‌شود (خوشدل و همکاران، ۱۳۹۹). به‌طورکلی، در منطقه موردمطالعه متوسط دمای سالانه ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد و میزان متوسط بارندگی سالانه نیز ۴۰۰ میلی‌متر است. جهت غالب باد منطقه غربی و متوسط سرعت باد سالانه ۵ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت است. علاوه بر باد غالب، بادهای محلی گرم‌باد (گرمش یا گرمیج) با جهت‌های جنوبی و جنوب غربی از دیگر ویژگی‌های آب و هوایی این منطقه است (مفیدی و همکاران، ۲۰۱۵). این بادهای گرم و خشک که از شمال البرز به طرف جلگه‌های ساحلی می‌وزد (عابد و همکاران، ۱۳۹٤) و گرمای محیط را در کوتاه‌ترین مدت چندین درجه افزایش می‌دهد، در آتش‌سوزی جنگل‌های منطقه اثرگذار است. مطالعات قبلی در مورد پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیمی در منطقه موردمطالعه نیز بر افزایش درجه حرارت و خشکی‌ها در این منطقه تأکید دارد که می‌تواند به میزان قابل‌توجهی بر افزایش خطر آتش جنگل در این ناحیه مؤثر باشد (خسروی و همکاران، ۱۳۹۱؛ کاظمی راد و همکاران، ۱۳۹٤).



شکل ۱- محدوده سیمای سرزمین جنگل سیاهکل در جنوب دریای کاسپین، در شمال شهرستان سیاهکل.

۲-۲- انتخاب سناریوهای تیمار ماده‌سوختنی و مدل‌سازی آتش

منطقه موردمطالعه یک سیمای سرزمین جنگلی ایده‌آل برای این بررسی به دلیل وسعت مکانی بزرگ و سابقه اجرای طرح‌های جنگلداری و پیاده‌سازی شیوه‌های مختلف جنگل‌شناسی از جمله تنک‌کردن در دهه‌های گذشته است. توده‌های طبیعی شامل راش (*Fagus orientalis* Lipsky)، ممرز (*Carpinus betulus* L.)، بلوط (*Quercus castaneifolia* C.A. Mey.)، افرا پلت (*Acer velutinum* Boiss.)، انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey.)، توسکای ییلاقی (*Alnus subcordata* C.A.Mey.) و توسکای قشلاقی (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) به همراه توده‌های دست کاشت افراپلت، صنوبر (*Populus caspica* Bornm.)، بلوط، کاج نوئل (*Picea abies* L. Karst.) و کاج تدا (*Pinus taeda* L.) سیمای سرزمین جنگلی منطقه موردمطالعه را تشکیل می‌دهد. نقشه تیپ پوشش گیاهی (ماده‌سوختنی) و توزیع مکانی توده‌های تنک‌شده (شکل ۲) از کتابچه‌های طرح‌های جنگلداری اجرا شده در منطقه موردمطالعه توسط اداره کل منابع طبیعی استان گیلان، تهیه شد.



شکل ۲- تیپ‌های ماده‌سوختنی اصلی منطقه موردمطالعه (a) و موقعیت توده‌های تنک‌شده همراه با نقشه ارتفاع (b).

در کل دو سناریو تیمار ماده‌سوختنی در این مطالعه انتخاب شد: ۱) سناریو بدون تیمار (NT) یا کنترل (بدون تنک‌کردن)؛ ۲) سناریو تیمارشده (TREAT) که شامل توده‌های تنک‌شده است. این توده‌ها در جنگل‌کاری‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ با برداشت ۱۰ درصد از رویه زمینی (۱۳۹٤–۱۳۸۷) و با یک حد قطر برابر سینه بیش از ۱۵ سانتی‌متری تنک شد. سناریو تیمارشده بر اساس شرایط رطوبت ماده‌سوختنی سطحی خود از دو سناریو شامل ۱) محتوای رطوبت ماده‌سوختنی بعد از تنک‌کردن تغییر نکرده (TREAT-FMC) و ۲) محتوای رطوبت ماده‌سوختنی بعد از تنک‌کردن کاهش یافته (TREAT-LMC)، تشکیل شده است. برآورد رطوبت ماده‌سوختنی بدون تیمار و تیمارشده بر اساس مدل گسترش آتش سطحی روترمال (۱۹۷۲) و روش ارائه شده در مطالعه جهدی و همکاران (۱۳۹٤) انجام شد. ضمناً، ورودی‌های آب و هوا برای برآورد رطوبت ماده‌سوختنی و نیز مدل‌سازی آتش از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی دیلمان (۱٤٤۸ متر: '۳٦°۵۳ عرض شمالی، '٤۹°٥٤ طول شرقی) و ابزم (۷۷ متر؛ '٤٠°٤٠ عرض شمالی، '٤١°١١ طول شرقی) در منطقه موردمطالعه استخراج شد.

در این مطالعه از ArcFuels (اگر و همکاران، ۲۰۰۶) برای تسهیل برنامه‌ریزی تیمار ماده‌سوختنی و تجزیه‌وتحلیل آثار استفاده کردیم. ArcFuels مجموعه‌ای از ماکروهای ArcGIS است که ارتباط بین مجموعه‌ای از مدل‌ها و برنامه‌های دیگر را که معمولاً در برنامه‌ریزی تیمار ماده‌سوختنی در مقیاس سیمای سرزمین استفاده می‌شود مانند شبیه‌سازهای رشد و محصول گیاهان، مدل‌های رفتار آتش، ArcGIS و نرم‌افزار دسکتاپ، تسهیل می‌کند. مدل‌سازی رفتار آتش با استفاده از الگوریتم حداقل زمان حرکت در مدل FlamMap (نسخه ٦,١؛ فینی، ۲۰۰٦) با معرفی دو فایل سیمای سرزمین (شامل نقشه‌های رستری توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت) و مدل ماده‌سوختنی سطحی و مشخصات تاج پوشش) بدون تیمار (NT) و تیمارشده (TREAT) انجام شد. شبیه‌سازی مولفه‌های احتمال سوختن، طول شعله شرطی (متر) و اندازه آتش (هکتار) با لحاظ مدت آتش‌سوزی متوسط ٦ ساعت و اندازه تفکیک ۳۰ متری، انجام شد. مطابق تعریف اگر و همکاران (۲۰۱۱) احتمال سوختن (BP) نسبت تعداد دفعاتی که یک سلول می‌سوزد به تعداد کل احتراق‌های آتش شبیه‌سازی شده است. همچنین طول شعله شرطی (CFL)، طول شعله با وزن احتمالی با توجه به وقوع آتش‌سوزی است و معیاری برای خطر آتش‌سوزی می‌باشد.

شبیه‌سازی‌ها بر اساس ۱۰,۰۰۰ نقطه احتراق تصادفی که با در نظر گرفتن نقاط احتراق تاریخی در منطقه مطالعه در طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱٤۰۰ درون‌یابی شده بود (جهدی و عربی، ۱۳۹۹)، برای دو سناریو بدون تیمار و تیمارشده، اجرا شد. شرایط آب و هوایی برای مدل‌سازی گسترش آتش با سناریو خشک (۷۵ درصد) با توجه به شرایط مشاهده‌شده در فصول آتش‌سوزی شدید در منطقه موردمطالعه، در نظر گرفته شد. در نهایت، به‌منظور شناسایی تفاوت‌ها بین تیمارها و تجزیه‌وتحلیل آماری نتایج مدل‌سازی، تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT به همراه بررسی نرمال‌بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف–اسمیرنوف در اکسل، انجام شد.

۳- نتایج و بحث

رفتار آتش برای سیمای سرزمین جنگلی موردمطالعه با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی احتمال سوختن، طول شعله شرطی و اندازه آتش ارزیابی شد. مقایسه‌ها بین تیمارهای مختلف ماده‌سوختنی (NT، TREAT-FMC و TREAT-LMC) تحت شرایط آب و هوا و احتراق آتش تاریخی در منطقه موردمطالعه انجام شد. نتایج این مقایسه در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین نقشه‌های رفتار آتش دو سناریو بدون تیمار و تیمارشده در شکل ۳ آمده است.

جدول ۱- ارزش‌های میانگین (انحراف از معیار)، کمینه و بیشینه رفتار آتش برای سناریوهای NT (بدون تیمار)، TREAT-FMC (تیمارشده با رطوبت ماده‌سوختنی ثابت بعد از تنک‌کردن) و TREAT-LMC (تیمارشده با رطوبت ماده‌سوختنی کمتر بعد از تنک‌کردن).

تیمار ماده سوختنی	BP			CFL (m)			FS (ha)		
	کمینه	بیشینه	میانگین (انحراف از معیار)	کمینه	بیشینه	میانگین (انحراف از معیار)	کمینه	بیشینه	میانگین (انحراف از معیار)
NT	۰/۰۰۰۰	۰/۰۸۱۳	^{a}۰/۰۰۷۱ (۰/۰۰۱۷)	۰/۰۰	۴/۲۵	(۰/۶۹۷)^{a}۰/۹۷۸	۰/۰۰	۲۴۵۴/۶۸	^{a}۴۸۲/۶۵ (۴۹۷/۷۳)
TREAT-FMC	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	^{b}۰/۰۰۷۵ (۰/۰۰۱۴)	۰/۰۰	۴/۲۵	^{b}۰/۹۰۱ (۰/۶۰۳)	۰/۰۰	۲۴۸۷/۷۹	^{b}۵۱۰/۰۵ (۴۸۴/۱۰)
TREAT-LMC	۰/۰۰۰۰	۰/۰۹۹۸	^{b}۰/۰۰۷۵ (۰/۰۰۱۴)	۰/۰۰	۴/۲۵	^{b}۰/۹۰۰ (۰/۶۰۴)	۰/۰۰	۲۴۸۶/۸۲	^{b}۵۰۹/۷۴ (۴۸۴/۱۱)

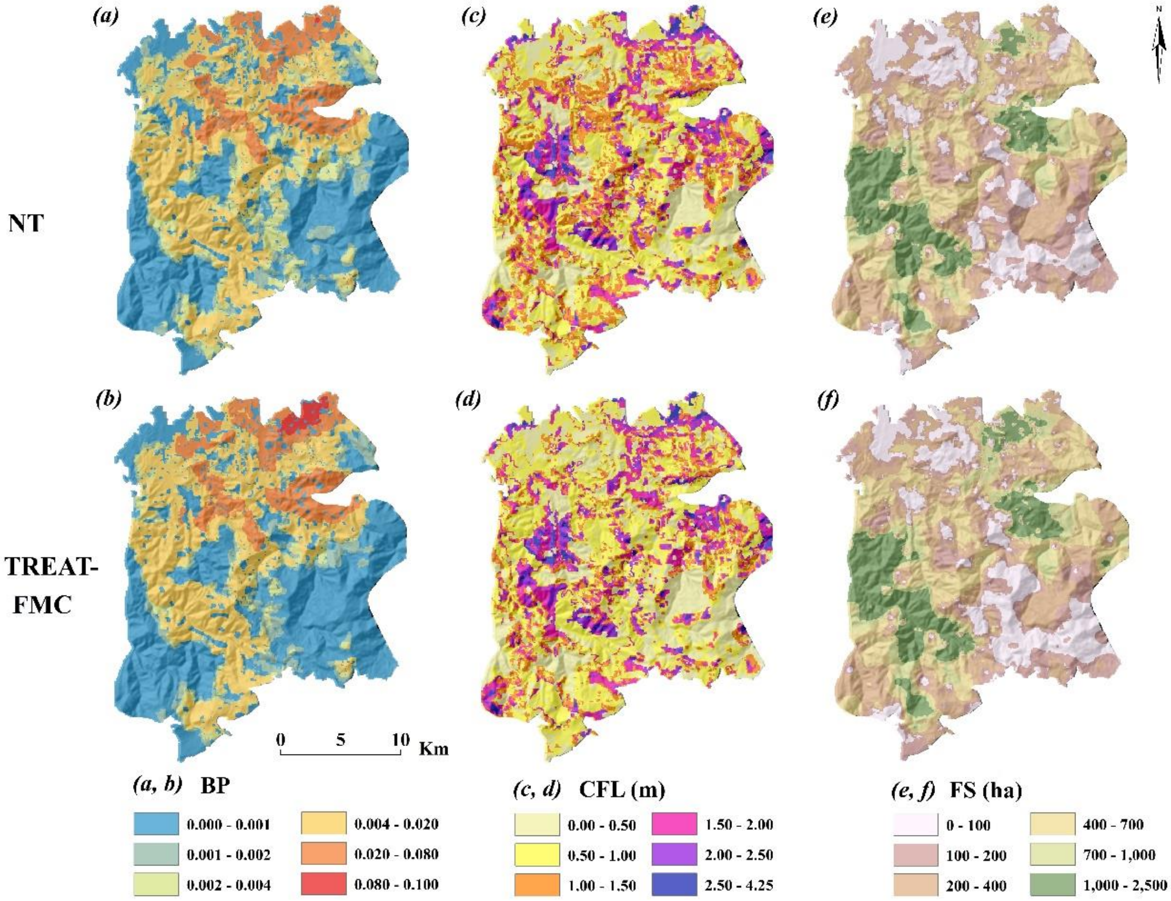
BP= احتمال سوختن؛ CFL= طول شعله شرطی؛ FS= اندازه آتش

تفاوت‌های معنی‌دار ($P < 0.05$) بین NT (بدون تیمار) و TREAT (تیمارشده) با حروف کوچک متفاوت در ستون میانگین ارزش‌ها ارائه شده است.

احتمال سوختن (BP) در منطقه مطالعه از ۰/۰ تا ۰/۰۸۱۳ با میانگین ۰/۰۰۷۱ برای سناریو پایه NT متغیر بود که به این معنا است که به طور متوسط هر پیکسل ۲۱۳ مرتبه (با لحاظ ۳۰,۰۰۰ احتراق شبیه‌سازی‌شده در سه سناریو تیمار ماده‌سوختنی) سوخته است (جدول ۱). سناریوهای TREAT-FMC و TREAT-LMC که در آنها تیمار تنک‌کردن ماده‌سوختنی به ترتیب با لحاظ رطوبت ماده‌سوختنی ثابت و رطوبت ماده‌سوختنی کاهش‌یافته انجام شده است، هر دو دارای متوسط احتمال سوختن ۰/۰۰۷۵ و تفاوت مشابه با سناریو NT بودند (جدول ۱). احتمال سوختن به ترتیب ۷ و ۶/۵ درصد نسبت به سناریو NT افزایش یافت.

طول شعله شرطی (CFL) از ۰/۰ تا ۴/۲۵ متر با ارزش متوسط ۰/۹۸ متر برای سناریو NT متغیر بود. سناریوهای TREAT-FMC و TREAT-LMC دارای متوسط طول شعله شرطی ۰/۹۰ متری بودند (جدول ۱). تفاوت بین تیمارها بسیار ناچیز و به طور متوسط این دو سناریو تیمارشده تقریباً به میزان ۸ درصد کاهش طول شعله شرطی نسبت به سناریو NT داشتند.

اندازه آتش شبیه‌سازی شده بر اساس نقاط احتراق تاریخی در منطقه موردمطالعه نیز بین سه سناریو تیمار ماده‌سوختنی مقایسه شد. متوسط اندازه آتش در سناریو NT، ۴۸۲/۶۵ هکتار بدست آمد (جدول ۱). اندازه آتش در دو سناریو TREAT-FMC و TREAT-LMC حدود ۵۱۰ هکتار بدست آمد که تقریباً ۵/۶ درصد افزایش اندازه آتش در نتیجه تنک‌کردن را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نقشه‌های احتمال سوختن (BP؛ a و b)، طول شعله شرطی (CFL (متر)؛ c و d) و اندازه آتش (FS (هکتار)؛ e و f) برای سناریوهای NT (بدون تیمار) و TREAT-FMC (تیمارشده با رطوبت ماده‌سوختنی ثابت بعد از تنک‌کردن)

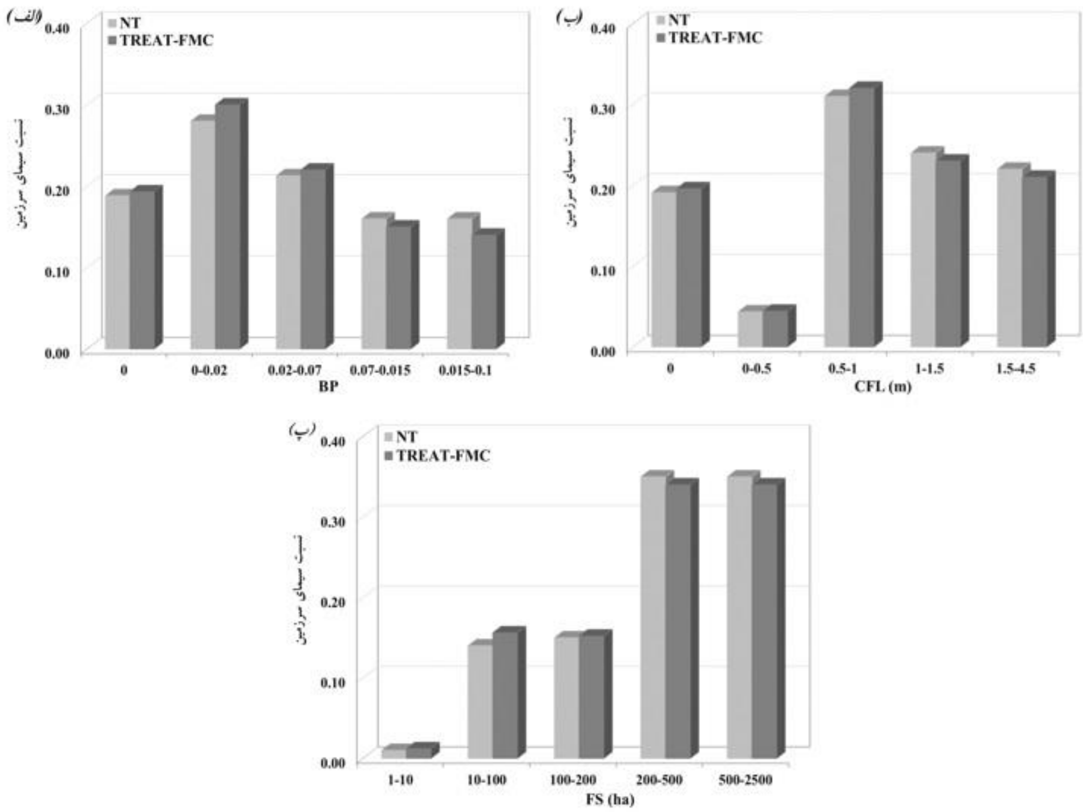
در برخی مطالعات قبلی مطرح شده که تنک‌کردن با تغییر میکرواقلیم (به‌عنوان‌مثال، تنک‌کردن تاج جنگل منجر به افزایش سرعت باد و تابش خورشیدی می‌شود) و تسریع خشک شدن ذرات ماده‌سوختنی، می‌تواند خطر بالقوه رفتار شـدید آتش‌سوزی را افزایش دهد (وایت‌هِد[1] و همکاران، ۲۰۰۶؛ کالیس و کنت، ۲۰۱۶؛ روسل[2] و همکاران، ۲۰۱۸). با این وجود، در بسـیاری از مطالعات دیگر گزارش شده که جنگل‌های تنک‌شده دارای شدت آتش کمتری نسبت به جنگل‌های تنک‌نشـده هستند (پارسونز و همکاران، ۲۰۱۸؛ بانرجی و همکاران، ۲۰۲۰؛ جانستون و همکاران، ۲۰۲۱)، یا دست‌کم تفاوت معنی‌داری از نظر رفتار آتش بین این جنگل‌ها مشاهده نشده است (استس و همکاران، ۲۰۱۲). در

1 Whitehead
2 Russell

این مطالعه، در ارتباط با تیمار تنک‌کردن انجام شده هر دو سناریو رطوبت ماده‌سوختنی ثابت و رطوبت ماده‌سوختنی کاهش‌یافته، در کاهش طول شعله شرطی نسبت به احتمال سوختن و اندازه آتش موثرتر بوده‌اند. این یافته با نتایج مطالعه آرِلانو-پرز[1] و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد، در حالی که مغایر با نتیجه مطالعه اچِودو مونوز[2] (۲۰۱٦) است. همچنین، نتایج این مطالعه نیز نشان می‌دهد که تفاوت‌های رطوبت ماده‌سوختنی ناشی از تنک‌کردن اثر قابل‌توجهی روی رفتار آتش نداشته است که مطابق با مطالعه استس و همکاران (۲۰۱۲) است.

در تکمیل ارائه نتایج، نمایه‌ای از توزیع فراوانی ارزش‌های سه مؤلفه آتش شبیه‌سازی شده در کلاسه‌های مختلف، در دو سیمای سرزمین بدون تیمار و تیمار شده در شکل ٤ ارائه شده است. با توجه به معنی‌دار نبودن تفاوت‌های مولفه‌های رفتار آتش در دو سناریو رطوبت ماده‌سوختنی ثابت (TREAT-FMC) و رطوبت ماده‌سوختنی کاهش‌یافته (TREAT-LMC) مطابق با نتایج جدول ۱، در ادامه بررسی نتایج به مقایسه سناریو بدون تیمار (NT) و تیمارشده با رطوبت ماده‌سوختنی ثابت (TREAT-FMC) پرداخته می‌شود. بر اساس شکل ٤، کاهش طول شعله شرطی و افزایش احتمال سوختن و اندازه آتش برای سناریو تیمارشده (TREAT-FMC) نسبت به سناریو بدون تیمار (NT) در کلاسه‌های مختلف متقارن نیست. به‌طورکلی نسبت سیمای سرزمین با مقادیر کمتر این سه مؤلفه رفتار آتش افزایش یافته است. در مورد احتمال سوختن، سهم سیمای سرزمین مطالعه شده با مقادیر احتمال سوختن کمتر از ۰/۰۷ افزایش داشته است، در حالی که این سهم در مقادیر بین ۰/۰۷ الی ۰/۱ کاهش قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. در مورد طول شعله شرطی نیز توزیع کلاسه‌های با ارزش‌های کمتر از یک متر افزایش داشته است، اما توزیع کلاسه‌ها با مقادیر طول شعله بیش از یک متر کاهش دارد. توزیع کلاسه‌های اندازه آتش نیز با افزایش در کلاسه‌های کمتر از ۲۰۰ هکتار و کاهش در کلاسه‌های با اندازه آتش بزرگتر مشاهده شده است.

1 Arellano-Pérez
2 Acevedo Muñoz



شکل ٤- توزیع فراوانی احتمال سوختن (BP؛ الف)، طول شعله شرطی (CFL (متر)؛ ب) و اندازه آتش (FS (هکتار)؛ پ) برای سناریوهای NT (بدون تیمار) و TREAT-FMC (تیمارشده با رطوبت ماده‌سوختنی ثابت بعد از تنک‌کردن)

با توجه به ثابت بودن مدت ســوختن برای آتش‌ســوزی‌های شبیه‌سازی‌شده در هر دو سناریو بدون تیمار و تیمار شــده، کاهش در مقادیر بالاتر مولفه‌های رفتار آتش می‌تواند ناشــی از کاهش نرخ گســترش آتش تحت تأثیر تیمار ماده‌سوختنی (تنک‌کردن) باشد. کاهش نرخ گسترش آتش و در واقع کاهش آسیب ناشی از آتش‌سوزی‌های شدیدتر (مقادیر زیادتر احتمال ســوختن، طول شــعله بلندتر و اندازه آتش بزرگتر) می‌تواند در نتیجه اجرای تیمار جنگل‌شناسی تنک‌کردن در توده‌های جنگل‌کاری باشد که مطابق با نتایج چی‌اونو[1] و همکاران (۲۰۱۷)، ارنی[2] و همکاران (۲۰۱۸) و جانسون و همکاران (۲۰۲۱) است.

1 Chiono
2 Erni

٤- جمع‌بندی

در طول دهه گذشـته، تحقیقات زیادی برای ارزیابی تیمارهای ماده‌سوختنی در آتش‌سوزی‌های جنگلی با استفاده از تکنیک‌های مدل‌ســازی انجام شــده اســت. زیرا مدل‌ســازی رفتار آتش درک بهتری از فرآیندهایی که فعالیت و الگوهای آتش را هدایت می‌کنند، فراهم می‌کند. علاوه بر این، استفاده از مدل‌های مشخص مکانی می‌تواند راهبردهای مدیریتی مؤثرتری را ارتقا دهد و از سـیاست‌های پیشگیری از آتش‌سوزی حمایت کند. این کار اولین مطالعه‌ای است که اثربخشـی بالقوه تیمارهای جنگل‌شناسی شبیه‌سازی شده بر رفتار آتش‌سوزی جنگل‌های هیرکانی ایران را گزارش می‌کند. نتایج شـبیه‌سـازی نشـان داد که تنک‌کردن در جنگل‌های دسـت‌کاشـت تأثیر قابل‌توجهی در تغییر سـاختار ماده‌سوختنی و در نتیجه رفتار بالقوه آتش‌سوزی در منطقه موردمطالعه دارد. به‌طورکلی تنک‌کردن در کاهش طول شعله شرطی و در نتیجه کاهش شدت آتش در منطقه موردمطالعه مؤثر بوده است، اگرچه افزایش اندکی در احتمال سوختن و اندازه آتش در برخی از نواحی مشــاهده شــد. عدم قطعیت‌هایی در ارتباط با مدل‌ســازی رفتار آتش‌ســوزی وجود دارد، اما تفاوت‌های نسـبی در پارامترهای رفتار آتش‌سـوزی در مقایسـه با سـیمای سـرزمین تیمارنشـده، می‌تواند تاحدی قابل‌اعتماد باشـد. علاوه بر این، سـطح جنگل‌کاری سـالانه به دلیل تضادهای سیاست عمومی با توجه اندک به احیای جنگل‌های بومی، که سهم تاریخی در افزایش اخیر فعالیت آتش‌سوزی‌های جنگلی دارند، در حال افزایش است. این موضوع مستلزم برنامه‌ریزی پیشگیرانه استفاده از زمین و مدیریت ماده‌سوختنی به‌عنوان بخش کلیدی اجرای مدیریت پایدار جنگل در جنگل‌های شمال کشور است.

کتابنامه

جهدی، رقیه؛ درویش‌صفت، علی‌اصغر؛ اعتماد، وحید؛ ۱۳۹٤. ارزیابی اثر وضعیت رطوبت ماده سوختنی بر گسترش و رفتار آتش در پارک ملی گلستان. *جنگل و فرآورده‌های چوب. مجله منابع طبیعی ایران*. ٦٨ (٤): ۸۱۳-۷۹۹. https://doi.org/10.22059/jfwp.2015.57116

جهدی، رقیه؛ عربی، مهدی؛ ۱۳۹۹. مدل‌ســازی مســیرهای آتش در اکوتون‌های جنگل-علفزار در پارک ملی گلســتان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۹ (۳): ۱٤۲-۱۲٥. https://doi.org/10.22067/geoeh.2020.67030.0

خسـروی، محمود؛ زهرایی، اکبر؛ حیدری، حسـین؛ بنی نعیمه، سارا؛ ۱۳۹۱. تعیین مناطق هم خشکسالی استان گیلان با استفاده از شاخص ناهنجاری بارش. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱ (۳): ۲۰-۱. https://doi.org/10.22067/geo.v1i3.13231

خوشـدل، ناصـر؛ رضایی، پرویز؛ متولی، صدرالدین؛ جانباز قبادی، غلامرضا؛ ۱۳۹۹. تبیین اقلیم گردشگری شرق استان گیلـان و طبقه‌بندی مکانی آن به روش آماری چندمتغیره. *فصـــلنامه علمی مطالعات برنامه‌ریزی ســـکونت‌گاه‌های انسانی*. ۱٥ (٤): ۱۱۳٦-۱۱۱۹. https://jshsp.rasht.iau.ir/article_676362.html

عابد، حسین؛ صحرائیان، فاطمه؛ رضایی، پرویز؛ ۱۳۹٤. اثرات باد گرمش بر وضعیت جوی ایستگاه همدیدی رشت. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ٤ (۲): ۷٦–۵۹. https://doi.org/10.22067/geo.v4i2.29820

کاظمی راد، لادن؛ محمدی، حسین؛ ۱۳۹٤. ارزیابی مدل مناسب گردش عمومی جو برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استان گیلان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ٤ (٤): ۷٤–۵۵. https://doi.org/10.22067/geo.v4i4.38892

Acevedo Muñoz, L., 2016. A novel approach to reduce fire exposure and promote nature conservation in Mediterranean ecosystems: the case study of Reserva Natural da Serra da Malcata, Portugal. Lisboa: ISA, 2016, 80 p. http://hdl.handle.net/10400.5/12176

Agee, J.K., & Lolley, M.R., 2006. Thinning and prescribed fire effects on fuels and potential fire behavior in an eastern Cascades Forest, Washington, USA. *Fire Ecol.* 2: 3–19. https://doi.org/10.4996/fireecology.0202003

Ager, A.A., Bahro, B., & Barber, K., 2006. Automating the fireshed assessment process with ArcGIS. In: Andrews, P.L., Butler, B.W., comps), Fuels Management—How to Measure Success: Conference Proceedings. Portland, OR, March 28–30, 2006, pp. 163–167; Proceedings RMRS-P-41. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, 809 pp. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/25943

Ager, A.A., Barros, A.M.G., Houtman, R., Seli, R., & Day, M.A., 2020. Modelling the effect of accelerated forest management on long-term wildfire activity. *Ecological Modelling*. 421:108962. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.108962

Ager, A.A., Vaillant, N.M., & Finney, M.A., 2011. Integrating fire behavior models and geospatial analysis for wildland fire risk assessment and fuel management planning. *Journal of Combustion.* 2011, Article ID 572452: 1-19. https://doi.org/10.1155/2011/572452

Arellano-Pérez, S., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González, J.G., Alonso-Rego, C., Vega, J.A., & Ruiz-González, A.D., 2020. Mid-term effects of a thin-only treatment on fuel complex, potential fire behavior and severity and post-fire soil erosion protection in fast-growing pine plantations. *For. Ecol. Manag.* 460:117895. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117895

Banerjee, T., 2020. Impacts of forest thinning on wildland fire behavior. *Forests*. 11(9):918. https://doi.org/10.3390/f11090918

Chiono, L.A., Fry, D.L., Collins, B.M., Chatfield, A.H., & Stephens, S.L., 2017. Landscape-scale fuel treatment and wildfire impacts on carbon stocks and fire hazard in California spotted owl habitat. *Ecosphere.* 8(1):e01648. https://doi.org/10.1002/ecs2.1648

de Castro Galizia, L.F., & Rodrigues, M., 2019. Modeling the Influence of Eucalypt Plantation on Wildfire Occurrence in the Brazilian Savanna Biome. *Forests*. 10(10): 844. https://doi.org/10.3390/f10100844

Erni, S., Arseneault, D., & Parisien, M.A., 2018. Stand Age Influence on Potential Wildfire Ignition and Spread in the Boreal Forest of Northeastern Canada. Ecosystems. 21: 1471–1486. https://doi.org/10.1007/s10021-018-0235-3

Estes, B.L., Knapp, E.E., Skinner, C.N., & Uzoh, F.C., 2012. Seasonal variation in surface fuel moisture between unthinned and thinned mixed conifer forest, northern California, USA. *Int. J. Wildland Fire.* 21: 428–435. https://doi.org/10.1071/WF11056

Finney, M.A., 2006. An overview of FlamMap fire modelling capabilities. In: Andrews, P.L., Butler, B.W. (Eds.), ‘Fuels Management – How to Measure Success: Conference Proceedings’, 28-30 March 2006, Portland, OR, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Proceedings RMRS-P 41, pp. 213–220 (Fort Collins, CO. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/25948

Freer-Smith, P., Muys, B., Bozzano, M., Drössler, L., Farrelly, N., Jactel, H., Korhonen, J., Minotta, G., Nijnik, M., & Orazio, C., 2019. Plantation forests in Europe: challenges and opportunities. From Science to Policy 9. European Forest Institute. https://doi.org/10.36333/fs09

Gomez-Gonzalez, S., Ojeda, F., & Fernandes, PM., 2018. Portugal and Chile: Longing for sustainable forestry while rising from the ashes. *Environmental Science and Policy*. 81: 104-107. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.006

Hahn, G.E., Coates, T.A., Aust, W.M., Bolding, M.C., & Thomas-Van Gundy, M.A., 2021. Long-term impacts of silvicultural treatments on wildland fuels and modeled fire behavior in the Ridge and Valley Province, Virginia (USA). *For. Ecol. Manag.* 496:119475. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119475

Hood, S.M., Baker, S., & Sala, A., 2016. Fortifying the forest: thinning and burning increase resistance to a bark beetle outbreak and promote forest resilience. *Ecol Appl.* 26:1984–2000. https://doi.org/10.1002/eap.1363

Jaque Castillo, E., Fernández, A., Fuentes Robles, R., & Ojeda, C.G., 2021. Data-based wildfire risk model for Mediterranean ecosystems – case study of the Concepción metropolitan area in central Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 21(12): 3663-3678. https://doi.org/10.5194/nhess-21-3663-2021.

Johnston, J.D., Olszewski, J.H., Miller, B.A., Schmidt, M.R., Vernon, M.J., Ellsworth, L.M., 2021. Mechanical thinning without prescribed fire moderates wildfire behavior in an Eastern Oregon, USA ponderosa pine forest. *For. Ecol. Manag.* 501:119674. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119674

Kalies, E.L., & Kent, L.L.Y., (2016. Tamm review: are fuel treatments effective at achieving ecological and social objectives? A systematic review. *For. Ecol. Manag.* 375:84–95. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.021

Knapp, E.E., Lydersen, J.M., North, M.P., & Collins, B.M., 2017. Efficacy of variable density thinning and prescribed fire for restoring forest heterogeneity to mixed-conifer forest in the central Sierra Nevada, CA. *For. Ecol. Manag.* 406: 228-241. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.028.

Marshall, G., Thompson, D.K., Anderson, K., Simpson, B., Linn, R., Schroeder, D., 2020. The impact of fuel treatments on wildfire behavior in North American Boreal fuels: a simulation study using FIRETEC. *Fire*. 3(2):18. https://doi.org/10.3390/fire3020018

Martín, A., Botequim, B., Oliveira, T.M., Ager, A., & Pirotti, F., 2016. Temporal optimization of fuel treatment design in blue gum (Eucalyptus globulus) plantations. *Forest Systems*. 25 (2): eRC09. http://dx.doi.org/10.5424/fs/2016252-09293.

Mofidi, A., Soltanzadeh, I., Yousefi, Y., Zarrin, A., Soltani, M., Samakosh, J.M., Azizi, G., & Miller, S.T.K., 2015. Modeling the exceptional south Foehn event (Garmij) over the Alborz Mountains during the extreme forest fire of December 2005. *Nat Hazards.* 75:2489–2518. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1440-9

Paritsis, J., Landesmann, J.B., Kitzberger, T., Tiribelli, F., Sasal, Y., & Quintero, C., Dimarco, R.D., Barrios-García, M.N., Iglesias, A.L., Diez, J.P., Sarasola, M., Nuñez, M.A., 2018. Pine Plantations and Invasion Alter Fuel Structure and Potential Fire Behavior in a Patagonian Forest-Steppe Ecotone. *Forests*. 9: 117. https://doi.org/10.3390/f9030117

Parsons, R.A., Pimont, F., Wells, L., Cohn, G., Jolly, W.M., de Coligny, F., Rigolot, E., Dupuy, J.L., Mell, W., & Linn, R.R., 2018. Modeling thinning effects on fire behavior with STANDFIRE. *Ann. For. Sci.* 75:7. https://doi.org/10.1007/s13595-017-0686-2

Rothermel, R.C., 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 p. https://doi.org/10.2737/INT-GTR-143

Russell, E.S., Liu, H., Thistle, H., Strom, B., Greer, M., & Lamb, B., 2018. Effects of thinning a forest stand on sub-canopy turbulence. *Agric. For. Meteorol.* 248: 295–305. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.019

Salis, M., Del Giudice, L., Arca, B., Ager, A.A., Alcasena, F.J., Lozano, O., Bacciu, V., Spano, D., Duce, P., 2018. Modelling the effects of different fuel treatment mosaics on wildfire spread and behaviour in a Mediterranean agro-pastoral area. *J. Environ. Manage.*, 212: 490–505. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.020

Thompson, M.P., & Calkin, D.E., 2011. Uncertainty and risk in wildland fire management: A review. *J. Environ. Manag.* 92: 1895–1909. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.015

Whitehead, R.J., Russo, G.L., Hawkes, B.C., Taylor, S.W., Brown, B.N., Barclay, H.J., Benton, R.A., 2006. Effect of a Spaced Thinning in Mature Lodgepole Pine on Within-Stand Microclimate and Fine Fuel Moisture Content. In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 523-536. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/25975